دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی هسته ای

طراحی مفهومی قلب یک راکتور تحقیقاتی، با قدرت ۱۰MW مشابه راکتور تحقیقاتی تهران

نگارش:

بهاره روستایی

اساتید راهنما :

دکتر هادی دویلو- دکتر کامران سپانلو

استاد مشاور:

دکتر صمد خاکشورنیا

بهمن ۱۳۸۶

بسمه تعالی

دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)
معاونت پژوهشی

فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا

تاریخ ..... /...۰۸../....۸۳.....

پیوست .....

نام و نام خانوادگی : بهاره روستایی دانشجوی آزا د☒ بورسیه☐ معادل☐

شمارهٔ دانشجوئی :۸۴۱۱۲۰۰۳ **دانشکده: مهندسی هسته ای و فیزیک** **رشتهٔ تحصیلی : مهندسی راکتور**

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : هادی دویلو–کامران سپانلو

عنوان پایان نامه به فارسی : **طراحی مفهومی قلب یک راکتور تحقیقاتی، با قدرت ۱۰MW مشابه راکتور تحقیقاتی تهران**

عنوان پایان نامه به انگلیسی : Conceptual design of core of a research reactor similar to Tehtan reactor

نوع پروژه : کارشناسی ارشد : ☒ دکتـــری ☐ کاربردی ☒ بنیادی ☐ توسعه ای ☐ نظری ☐

تاریخ شروع: ۱۸/۷/۸۵ **تاریخ خاتمه**: زمستان ۸۶ **تعداد واحد : ۶**

واژه های کلیدی به فارسی : طراحی قلب، طراحی نوترونی، طراحی ترموهیدرولیکی، حاشیه ایمنی، LOFA

وا ژه های کلیدی به انگلیسی: core design, neutronic design, thermal-hydraulic design, safety margin, LOFA

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیتهای پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما : هادی دویلو

دانشجو : بهاره روستایی

امضاء استاد راهنما : **تاریخ : ۸۶/۱۲/۸**

نسخهٔ ۱ : معاونت پژوهشی
نسخهٔ ۲: کتابخانه و به انضمام دوجلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

تقدیم به

دو ستاره درخشان آسمان زندگیم،

پدر و مادر عزیزم

تقدیم به

همسر مهربانم

با تقدیر و تشکر فراوان از اساتید محترم جناب آقای دکتر دویلو و جناب آقای دکتر سپانلو که راهنمای من در ارائه مطلوب این رساله بودند.

با سپاس فراوان از استاد محترم جناب آقای دکتر خاکشورنیا که در کلیه مراحل مطالعه و تدوین این رساله بنده را یاری نموده و کمال توجه را مبذول داشته اند.

با تشکر و قدردانی از جناب آقای علیرضا شهیدی که بخشی از این رساله با همکاری ایشان انجام گردید.

چکیده

راکتورهای تحقیقاتی در مقایسه با راکتورهای قدرت، کوچک می باشند. آنها از راکتورهای قدرت ساده تر بوده و در دماهای پایین تر کار می کنند. این راکتورها دارای کاربردهای فراوان در زمینه های متعددی نظیر تولید رادیوداروها و انجام آزمایشات تحقیقاتی گوناگون می باشند.

در این پایان نامه ابتدا، راکتور تحقیقاتی تهران معرفی گردیده و سپس، به محاسبه پارامترهای عمده طراحی قلب یک راکتور تحقیقاتیMW ۱۰ شبیه راکتور تهران پرداخته شده است. محاسبات نوترونی با درنظر گرفتن یک قلب پیشنهادی شامل ۱۴ عنصر سوخت استاندارد و ۵ عنصر سوخت کنترل صورت گرفته و آنگاه نتایج به دست آمده، با محدودیت های طراحی نوترونی همچون حاشیه خاموشی و ضریب ایمنی راکتیویته مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرحله بعد، محاسبات ترموهیدرولیکی انجام گرفته و حاشیه ایمنی قلب نسبت به پدیده های بحرانی نظیر ناپایداری جریان خنک کننده و DNB تعیین شده است. همچنین در راکتور طراحی شده، حادثه از دست رفتن جریان خنک کننده(LOFA) مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج به دست آمده از محاسبات نشان می دهد که راکتور طراحی شده با قلب پیشنهادی اولیه، داخل حاشیه ایمنی درنظرگرفته شده برای راکتورهای نوع MTR ، قادر به تولیدMW ۱۰ توان حرارتی می باشد.

کلمات کلیدی: طراحی قلب، طراحی نوترونی، طراحی ترموهیدرولیکی، حاشیه ایمنی، LOFA

فهرست

عنوان	صفحه
فصل اول : آشنایی با راکتور تحقیقاتی تهران	۱
۱-۱-مشخصات استخر بتونی راکتور	۳
۱-۲-ساختمان پل	۴
۱-۳-قلب راکتور	٤
۱-۴-سیستم خنک کننده	۹
۱-۵-سیستم کنترل	۱۵
۱-۶ –سیستم اندازه گیری	۱۶
۱-۷- سیستم ایمنی راکتور	۱۷
فصل دوم : معرفی کدهای نوترونی	۱۹
۲-۱-محاسبات سلولی	۲۰
۲-۲- مجموعه نرم افزاری MTR_PC	۲۳
۲-۳- کد کامپیوتری محاسبات سلولی WIMS-D4	۲۵
۲-۴-برنامه HXS	۳۴
۲-۵-محاسبات قلب	۳۵
۲-۶-کد محاسبات نوترونی قلب راکتور CITVAP	۳۸
فصل سوم : معرفی کدهای ترموهیدرولیکی	۴۰
۳-۱-روابط هیدرولیکی جریان سیال تراکم ناپذیر	۴۱

۳-۲-کد ترموهیدرولیکی CAUDVAP ۵۰
۳-۳-کد ترموهیدرولیکی TERMIC ۵۲
۳-۴-کد هیدرولیکی PD-PIPING ۶۸
۳-۵- کد هیدرولیکی TRANS ۶۹
فصل چهارم : محدودیت های طراحی نوترونی و ترموهیدرولیکی ۸۱
۴-۱-محدودیت های طراحی نوترونی ۸۲
٤-۲-محدودیت های طراحی ترموهیدرولیکی ۸٦
فصل پنجم : نتایج محاسبات نوترونی و ترموهیدرولیکی ۹۳
۵-۱-محاسبات نوترونی ۹٤
۵-۲- محاسبات ترموهیدرولیکی ۱۰۷
۵-۳-نتیجه گیری ۱۲۹
۵-۴- پیشنهادات ۱۲۹
فهرست مراجع ۱۳۰
پیوست الف- ورودی کدهای کامپیوتری ۱۳۱
پیوست ب-جدول خواص ترمودینامیکی بخار اشباع ۱٤۲
پیوست ج- Benchmark ۱٤۳
چکیده لاتین ۱۴۵
عنوان لاتین ۱۴۶

فصل اول

آشنایی با راکتور تحقیقاتی تهران

راکتور تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران از نوع استخری[1] با قدرت حداکثرMW ۵ مـی باشـد. قلب راکتور از نوع غیرهمگن[2] با سوخت جامد است و در درون آب استخر غوطه ور می باشـد. آب علاوه بر کندکننده بعنوان خنک کننده و همچنین حفاظ در مقابل پرتوها به کار برده می شود. اسـتخر از سیمان و بتن ساخته شده و دارای دو قسمت مـی باشـد و قلـب در هـر یـک از ایـن قسـمت هـا می تواند در حال کار باشد. روی استخر یک پل متحرک نصب شده است و قلب به وسیله پایه هـای آلومینیومی از آن آویزان می باشد. کنترل راکتور به وسیله وارد کردن و خارج ساختن میله های کنترل جاذب نوترون در داخل قلب انجام می شود. علاوه بر سیستم کنترل، راکتور دارای ضـریب راکتویتـه دمایی منفی می باشد که این مسئله سبب کنترل خودکار راکتور می گردد.

حرارت تولید شده بوسیله واکنش های هسته ای توسط سیستم خنک کننده مـدار اولیـه از طریـق مبدل حرارتی آب به آب[3] به مدار ثانویه منتقل شده و سـپس در اتمسـفر تلـف مـی شـود. سـاختمان محفظه ایمنی راکتور به شکل گنبدی و استوانه قائم بوده که قطر آن در حدود ۲۹/۸۷ متر و ارتفاع آن ۱۳/۷۲ متر می باشد. حجم هوای داخل محفظه ایمنی در حدود ۱۵۰۰۰ مترمکعب است[۱].

در جدول ۱-۱ برخی از مشخصات راکتور ذکر شده است.

مؤلفه های راکتور

مؤلفه ها یا سیستم های اصلی راکتور تحقیقاتی از نـوع اسـتخری شـامل اسـتخر، پـل، سـاختار حفاظ قلب، قلب، سیستم خنک کننده، سیستم کنترل، سیستم اندازه گیری، سیستم ایمنی، تجهیزات تهویه و تأسیسات آزمایشگاهی می باشد. در ذیل به معرفی برخی از آنها می پردازیم.

---

1. Pool type
2. Hetrogenous
3. Heat Exchanger Water to Water

جدول۱-۱ مشخصات راکتور[۱]

توان حرارتی	۵ مگاوات
سوخت	U-235 نوع MTR با غنای کم با غلاف آلومینیوم
متوسط شار نوترون حرارتی در توان ۵ مگاوات	$۳/۱\times۱۰^{۱۳}$ $cm^{-۲}.sec^{-۱}$
تعداد صفحات هر عنصر سوخت	۱۹ برای عنصر سوخت استاندارد (SFE) ۱۴ برای عنصر سوخت کنترل (CFE)
ابعاد قلب	$۴۰/۵ \times ۳۸/۵۴ \times ۸۹/۷$ $cm^{۳}$
کند کننده	آب سبک
حفاظ	آب، سرب، بتون باریتس(Barytes) و بتون معمولی(regular)
خنک کننده	آب سبک
سیستم خنک سازی	جریان اجباری مدار اولیه میان مبدل حرارتی نوع پوسته و لوله، مدار ثانویه تلف کننده حرارت در برج خنک کننده
دمای خنک کننده در ورودی	$۳۷/۸\ ^{\circ}C$
جریان خنک کننده اولیه	۰/۱۳۹ $m^{۳}/sec$ (۵۰۰ $m^{۳}/hr$)
جریان خنک کننده ثانویه	۰/۱۴۵ $m^{۳}/sec$ (۵۲۲ $m^{۳}/hr$)
میله های کنترل	۴ میله ازجنس نقره-ایندیم-کادمیم ۱ میله ازجنس فولاد زنگ نزن

۱-۱-مشخصات استخر بتونی راکتور

استخر راکتور از بتون مسلح ساخته شده و دارای ۱۶/۲ متر طول، ۷ متر عرض و ۹/۸ مترارتفاع می باشد[۱]. بر روی دیوار استخر یک پل متحرک قرار دارد و قلب به وسیله آن درون آب معلق می باشد. ارتفاع آب بالای قلب و ضخامت دیواره های بتونی حفاظ بیولوژیکی لازم را در مقابل تشعشع قلب فراهم می آورد.

آستری از جنس فولاد زنگ نزن محوطه داخل استخر را فراگرفته است. هدف اصلی گذاشتن این

آستری جلوگیری از نشت آب استخر می باشد. ضخامت این آستر ۵ میلیمتراست که در جلوی ستون حرارتی و اتاق پرتودهی گاما به ۱ میلیمتر می رسد، به طوری که بیشترین شار ممکن وارد تجهیزات پرتودهی شود[۱].

در هنگام ساخت استخر تجهیزاتی در درون دیواره ها و کف بتنی استخر قرار داده شده است. این تجهیزات شامل تعدادی لوله جهت آب ورودی و خروجی استخر، لوله های سرریز، صفحات و پیچ های نگهدارنده جهت نصب اتاقک های آزمایش، صفحات آلومینیومی و اتصالات مربوطه برای سوار نمودن ریل های پل متحرک قلب راکتور، حفاظ های حرارتی و وسایل و تجهیزات دیگر می باشد.

دروازه جدا کننده دو استخر اجازه می دهد که هر کدام از استخرها به طور مستقل انجام وظیفه نماید. دروازه جدا کننده با ارتفاع ۹/۱۵ متر و عرض ۱/۲۲ مترو از جنس آلومینیوم می باشد، که در اطراف آن واشر لاستیکی آب بندی قرار می گیرد که از نفوذ آب جلوگیری می نماید[۱].

۱-۲-ساختمان پل

پل در بالای استخر و در عرض آن نصب شده است که اجزاء و قسمت های مختلف قلب را درون آب معلق نگه می دارد. به منظور قرار دادن قلب در هر یک از دو قسمت استخر، پل می تواند در طول استخر به طور دستی حرکت نماید.

پایه های نگهدارنده قلب دارای ساختمان چهارچوبی و از جنس آلومینیوم می باشد و به طور عمودی در داخل استخر قرار داشته و از پل آویزان می باشد. در ارتفاع ۸ متری زیر سطح آب صفحه ای مشبک به منظور نگهداری میله های سوخت و سایر وسایل، به این پایه ها نصب شده است[۱].

۱-۳-قلب راکتور

قلب راکتور از عناصر سوخت نوعMTR[1] تشکیل یافته است و آنها را می توان با الگوهای متنوعی در کنار هم قرار داد. در شکل(۱-۱) دو آرایش بعنوان نمونه نشان داده شده است.

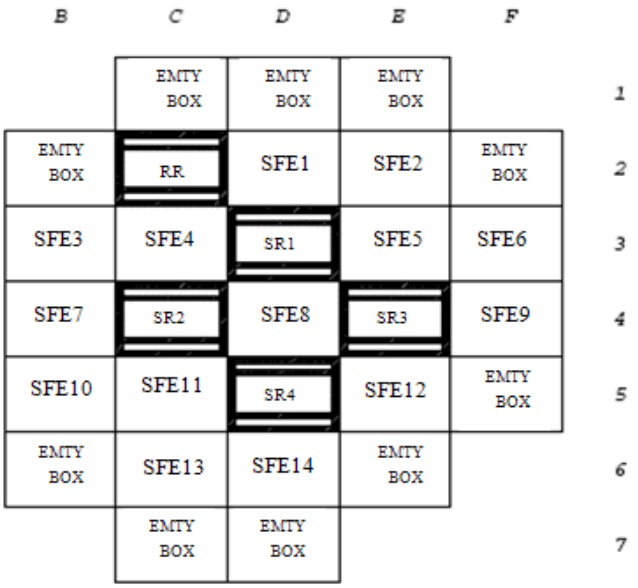
قلب راکتور از قسمت های زیر تشکیل یافته است :

۱-۳-۱- صفحه مشبک[2]

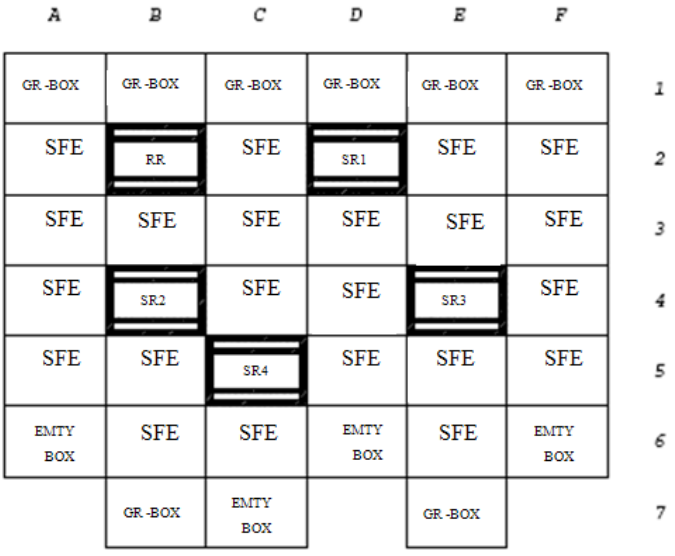
صفحه مشبک از صفحه ای آلومینیومی با خلوص بسیار و ضخامتcm ۱۲/۶ ساخته شده است.

1.Material test reactor
2. Grid Plate

این صفحه به طور عمودی در انتهای پایه های نگه دارنده قلب نصب شده است. در روی صفحه ۵۴ عدد سوراخ برای ورود قسمت انتهایی عنصر سوخت به طور منظم و با آرایش مستطیلی ۹×۶ تعبیه شده است به طوریکه بین این سوراخ ها ۴۰ عدد سوراخ کوچکتر به منظور عبور جریان آب بین عناصر سوخت و خنک کردن سطح خارجی آنها وجود دارد. بعد از آنکه تعداد مورد نظر از عناصر سوخت در جای خود قرار داده شد ، بقیه سوراخ های استفاده نشده را به دلیل جلوگیری از خروج آب از طریق آنها مسدود می نمایند[۱].



الف.آرایش قلب در اولین کارکرد راکتور[۱]،
۱۴ SFE و ۵ CFE



ب.قلب تعادلی[۱]

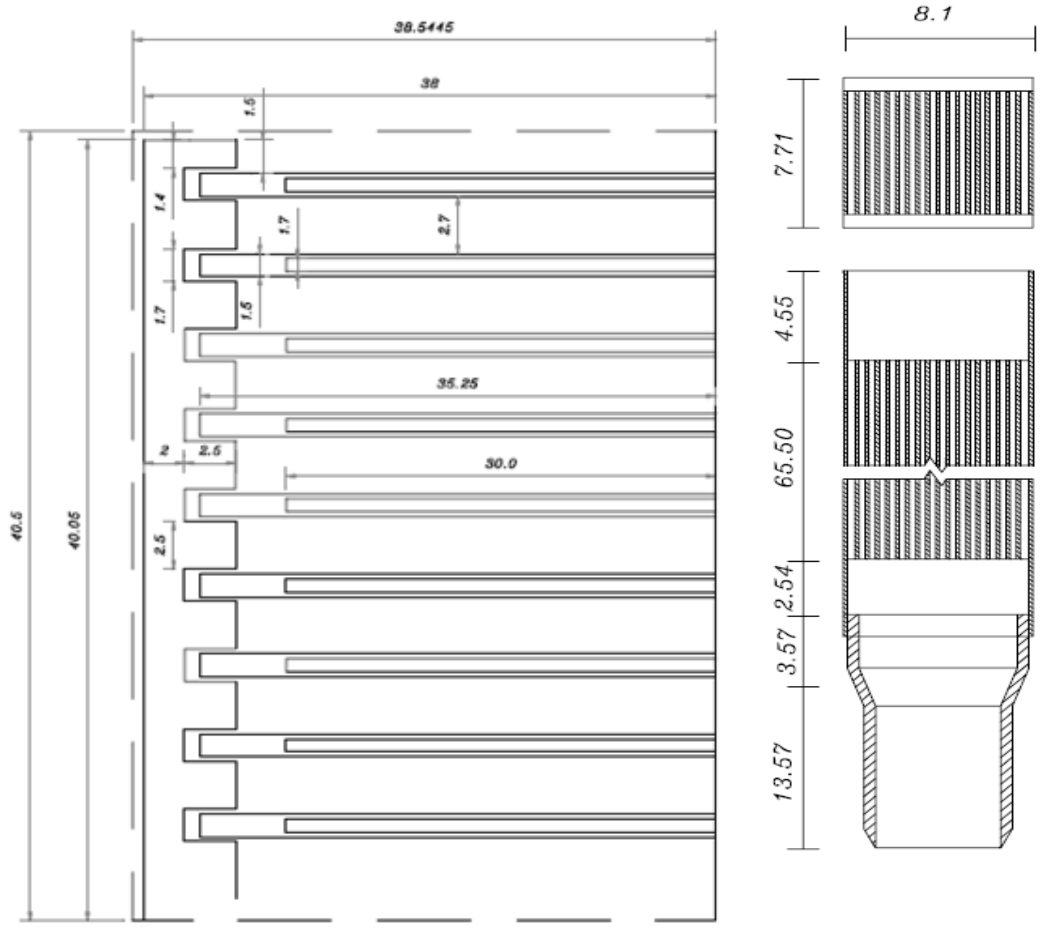
شکل۱-۱ آرایش های مختلف قلب[۱]، الف.آرایش قلب در اولین کارکرد راکتور، ب.قلب تعادلی

۱-۳-۲-عناصر سوخت[1]

سوخت مورد استفاده در راکتور تحقیقاتی تهران از نوع MTR با غنای کم LEU[2] می باشد. دو نوع عنصر سوخت از نوع LEU وجود دارد که هر نوع و خواص فیزیکی مربوط به آن در زیر توصیف شده است.

الف- عنصر سوخت استاندارد[3](SFE)

SFE یک سوخت از نوع MTR است و دارای غنای تقریباً ٪ ۲۰ وزنی U- ۲۳۵ بوده و به شکل صفحات مسطح می باشد. لایه سوخت U_3O_8 به صورت پودر در قالبی از جنس آلومینیوم خالص ساخته می شود. همان طور که در شکل ۱-۲ و با جزئیات بیشتر در شکل ۱-۳ نشان داده شده هر عنصر سوخت استاندارد دارای ۱۹ صفحه مسطح است که بین دو سطح جانبی



شکل ۱-۲ عنصر سوخت استاندارد[۱] (ابعاد به cm)

شکل ۱-۳ عنصر سوخت استاندارد باجزئیات بیشتر[۱] (ابعاد به mm)

1. Fuel Elements
2. Low Enriched Uranium
3. Standard Fuel Element

قرار می گیرند. صفحات جانبی وصفحات خارجی سوخت به قسمت انتهایی مجموعه سوخت جوش داده شده است[۱].

یک میله افقی به منظور جابجایی عنصر سوخت در قسمت بالای آن و بین دو سطح جانبی عنصر سوخت به دقت جوش داده شده است. خلاصه ای از اطلاعات مربوط به عنصر سوخت استاندارد در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

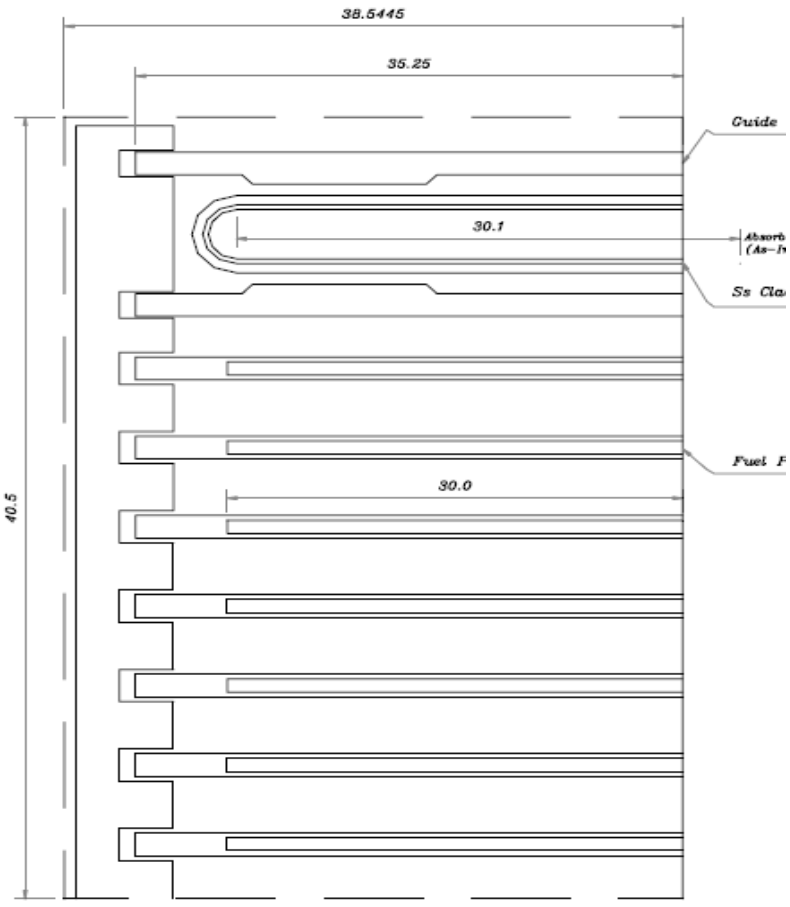
جدول ۱-۲ خلاصه ای از مشخصات مهم عنصر سوخت استاندارد[۱]

غنا	۲۰ ٪
تعداد صفحات سوخت	۱۹
ضخامت کل یک صفحه سوخت	۰/۰۰۱۵ m
ضخامت لایه سوخت(meat)	۰/۰۰۰۷ m
ضخامت غلاف	۰/۰۰۰۴ m
ضخامت کانال آب	۰/۰۰۲۷ m
عرض لایه سوخت	۰/۰۶ m
طول لایه سوخت	۰/۶۱۵ m
ضخامت دیوار جانبی	۰/۰۰۴۵ m
عرض کل صفحه سوخت (فاصله دیوار تا دیوار)	۰/۰۶۷ m
ابعاد عنصر سوخت	۰/۰۸۱ × ۰/۰۷۷ × ۰/۸۹۷ m^3
سطح انتقال حرارت	۱/۴۰۲۲ m^2
سطح جریان خنک کننده	۰/۰۰۳۳۹۲ m^2
طول مدخل کانال ورودی	۰/۰۴۵۵ m
قطر داخلی نازل ورودی	۰/۰۵۳ m
قطر خارجی نازل ورودی	۰/۰۶۱۵۹ m
جنس لایه سوخت	U_3O_8- AL
جنس غلاف صفحه سوخت و دیوار جانبی	AL ۶۰۶۱
چگالی اورانیوم در گوشت	۲۹۶۱/۷ kg/ m^3
درصد وزنی U در U_3O_8	۰/۸۴۷۷۲
اورانیوم در هر صفحه سوخت	۷۶/۵ × ۱۰ $^{-3}$ kg
U- ۲۳۵ در هر SFE	۲۹۰/۷ × ۱۰ $^{-3}$ kg
چگالی سوخت	۴۷۶۰ kg/ m^3
چگالی آلومینیوم	۲۷۰۰ kg / m^3
درصد وزنی ترکیبات سوخت:	
U- ۲۳۵	۱۲/۴۴۶۳ ٪
U- ۲۳۸	۴۹/۵۱۷۸ ٪
اکسیژن	۱۱/۱۷۸۹ ٪
آلومینیوم	۲۶/۵۸۹۶ ٪

هر صفحه سوخت از لایه سوخت و غلاف تشکیل شده است به طوری که لایه سوخت درون غـلاف قرار گرفته و غلاف به صورت محکم و غیر قابل نفوذ آب بندی شـده اسـت و بـدین ترتیـب باعـث جـدایی سـوخت و خنـک کننـده مـی گـردد. لایـه سـوخت از یـک لایـه پـودر همگـن U_3O_8 بـا غنای ٪ ۲۰ اورانیوم ۲۳۵ که در قالبی از آلومینیوم خالص قرار دارد، تشکیل شـده اسـت. غـلاف نیـز شامل یک قاب و دو پوشش از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ AL می باشد[۱].

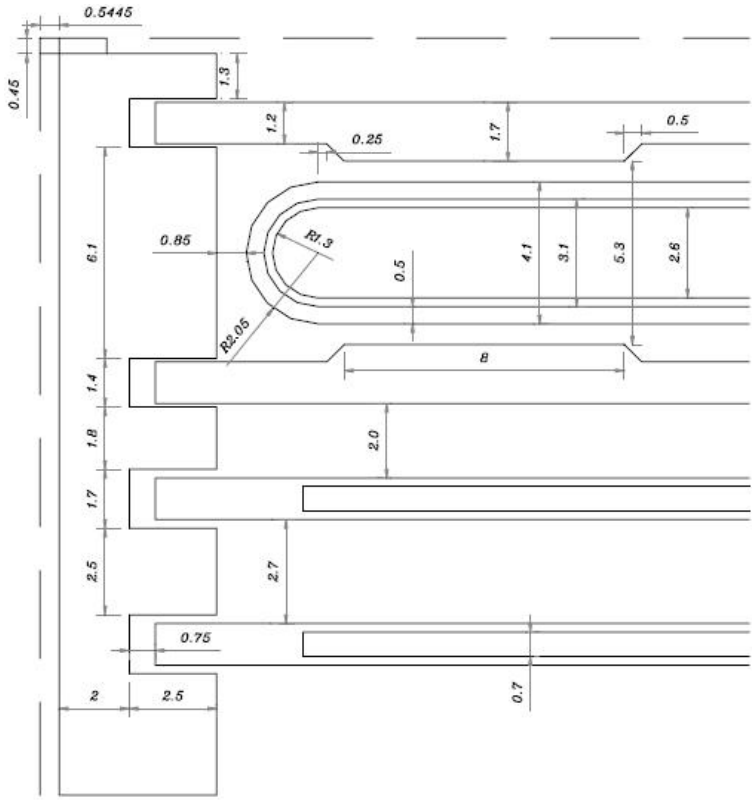
ب-عنصر سوخت کنترل[1] (CFE)

عنصر سوخت کنترل از نظر ابعاد خارجی به جـز ارتفـاع شـبیه عنصـر سـوخت اسـتاندارد می باشد با این تفاوت که دارای ۱۴ صفحه سوخت بوده و در بین این صفحات ، فضایی بـرای ورود میله های کنترل در نظر گرفته شده که در شکل های ۱-۴ و ۱-۵ به خوبی نشان داده شده است.



شکل۱-۴ عنصر سوخت کنترل (۱/۴ شکل واقعی)[۱] ابعاد به mm

1.Control Fuel Element



شکل ۱-۵ عنصر سوخت کنترل (۱/۴ شکل واقعی)[۱]ابعاد به mm

صفحه سوخت در CFE همانند SFE شامل لایه سوخت و غلاف می باشد که لایه سوخت از جنس U_3O_8 با آلیاژ آلومینیوم در غلافی از ۶۰۶۱ AL به طور کامل آب بندی شده است[۱].
خلاصه ای از اطلاعات مربوط به عنصرسوخت کنترل در جدول ۱-۳ آمده است.

۱-۴-سیستم خنک کننده

سیستم خنک کننده شامل مدار اولیه و ثانویه و سیستم تصفیه شیمیایی می باشد.
این سیستم به صورت زیرطراحی شده است:

- انتقال حرارت از مجموعه ی سوخت به مبدل حرارتی و سپس به برج خنک کننده در مدار ثانویه و سرانجام انتقال به هوا
- نگه داشتن دمای استخردر یک محدوده خاص و تأمین جریان لازم بطوریکه حرارت از مجموعه سوخت منتقل گردد.
- سیستم تصفیه آب در سیستم خنک کننده اولیه قادر است اثر خوردگی مجموعه سوخت و تجهیزات را کم کرده و با کاهش اکتیویته آب استخر، کارکنان و محیط اطراف را در برابر تشعشع حفاظت نماید.

جدول۱-۳ خلاصه ای از مشخصات مهم عنصر سوخت کنترل[۱]

غنا	٪ ۲۰
تعداد صفحات سوخت	۱۴
ضخامت کل یک صفحه سوخت	۰/۰۰۱۵ m
ضخامت لایه سوخت	۰/۰۰۰۷ m
ضخامت غلاف	۰/۰۰۰۴ m
ضخامت کانال آب	۰/۰۰۲۷ m
عرض لایه سوخت	۰/۰۶ m
طول لایه سوخت	۰/۶۱۵ m
ضخامت دیوار جانبی	۰/۰۰۴۵ m
عرض کل صفحه سوخت (فاصله دیوار تا دیوار)	۰/۰۶۷ m
ابعاد عنصر سوخت	۰/۰۸۱ × ۰/۰۷۷ ×۰/۱۶۱۵ m^3
سطح انتقال حرارت	۱/۰۳۳۲ m^2
سطح جریان خنک کننده	۰/۰۰۲۵۸۱ m^2
مواد سوخت	U_3O_8- AL
جنس غلاف صفحه سوخت و دیوار جانبی	AL ۶۰۶۱
مواد جاذب در میله کنترل ایمنی(Shim-safety rod)	نقره٪ ۸۵ ،ایندیم٪ ۱۵،کادمیم٪ ۵
مواد جاذب در میله کنترل تنظیمی(Regulating rod)	AISI-۳۱۶ L
ماده بین غلاف و جاذب در میله های کنترل	هلیوم در فشار ۱ اتمسفر
ماده غلاف در صفحات جاذب	AISI-۳۱۶ L

یک سیستم خنک کننده با گردش اجباری، درون راکتور تعبیه شده است که حرارت ناشی از واکنش های هسته ای را پراکنده می سازد. این سیستم شامل پمپ ها، یک مبدل حرارتی، جدا کننده مواد معدنی[1]، فیلتر و استخر که راکتور و سیستم خنک کننده اولیه را دربر دارد، می باشد. حرارت از مبدل حرارتی به وسیله سیستم خنک کننده ثانویه شامل پمپ، برج خنک کننده و لوله های مربوطه در اتمسفر پراکنده می گردد. سیستم خنک کننده و تصفیه کننده جریان در شکل ۱-۶ نمایش داده شده است[۱].

مشخصات مهم سیستم خنک کننده در جدول ۱-۴ نمایش داده شده است.

1. Demineralizer

جدول ۱-۴ مشخصات مهم سیستم خنک کننده[۱]

میزان جریان اولیه	۰/۱۳۹ m^3/sec
میزان جریان ثانویه	۰/۱۴۵ m^3/sec
مساحت استخر راکتور	۵۶/۷ m^2
حجم تانک تأخیری	۴۰۰ m^3
بیشترین دمای استخر	۳۷/۸ ° C
دمای خنک کننده اولیه در ورودی مبدل حرارتی	۴۶/۵ ° C
دمای خنک کننده اولیه در خروجی مبدل حرارتی	۳۷/۸ ° C
دمای خنک کننده ثانویه در ورودی مبدل حرارتی	۳۰/۶ ° C
دمای خنک کننده ثانویه در خروجی مبدل حرارتی	۳۸/۹ ° C

۱-۴-۱-سیستم خنک سازی اولیه

خنک سازی قلب در این راکتور توسط آب استخر که تحت نیروی گرانشی با دمای ۳۷/۸ ° C و میزان جریان ۰/۱۳۹ m^3/sec از میان مجموعه سوخت می گذرد، صورت می گیرد[۱]. آب از بین صفحات سوخت به طرف پایین سرازیر می شود و به دمایی در حدود ۴۶/۵ ° C می رسد. سپس، از طریق قسمت انتهایی هر عنصر سوخت به صفحه مشبک و پلنوم[1] که زیر صفحه مشبک واقع شده، وارد می گردد و از طریق لوله ها به داخل تانک تأخیری جریان می یابد و پس ازگذشت مدت زمان لازم برای واپاشی N^{16} و کاهش اثرات اکتیویته ناشی از آن، آب توسط نیروی پمپ از تانک تأخیری کشیده شده و به طرف مبدل حرارتی فرستاده می شود و پس از تبادل حرارت از مبدل حرارتی خارج شده و از طریق مسیر برگشت به استخر بازمی گردد. در مسیرهای ورود و خروج استخر شیرهایی نسب شده که از آنها برای مسدود کردن جریان وکنترل میزان عبور جریان استفاده می شود. شیر شناور[2] یکی از این شیرهاست که در کنار پلنوم واقع شده است، و به طور عادی به خاطر فشار منفی القا شده توسط جریان خنک کننده درون پلنوم، بسته می باشد. اگر جریان خنک کننده به مقدار معلومی افت نماید. این شیر به طور خودکار باز شده و اجازه می دهد خنک کننده به صورت گردش طبیعی[3] در قلب جریان یابد. یکی دیگر از این شیرها ، شیر پروانه ای[4] نام دارد که برای تنظیم میزان جریان درون قلب به کار برده می شود[۱].

1. Plenum
2. Natural circulation
3. Flapper valve
4. Butterfly valve

۱-۴-۲-پلنوم

پلنوم مسیر عبور خنک کننده بین قسمت انتهایی عناصر سوخت و صفحه مشبک به خروجی قلب می باشد. در قسمت انتهای پلنوم، یک لوله هادی جریان آب که شامل یک آکاردئونی فلزی[1] است، نصب شده است. آکاردئونی همراه با اتصالات مخصوص و واشرهای آب بندی، امکان جابجایی اندکی را در جهت عمودی میسر می سازد و بدین ترتیب امکان درگیری قسمت انتهای پلنوم و خروجی قلب راکتور را فراهم می سازد[۱].

۱-۴-۳-شیر ایمنی شناور

در کنار پلنوم شیر ایمنی شناور قرار دارد ، این شیر را می توان به وسیله وزنه های تعادل طوری تنظیم نمود که در مقدارمعینی از جریان آب باز شده و بدین ترتیب امکان گردش طبیعی آب را در اطراف صفحات سوخت فراهم سازد. باز شدن شیر باید طوری تنظیم گردد که راکتور درسطح قدرت زیر ۱۰۰ KW باشد زیرا در قدرت بالاتر، خنک شدن صفحات سوخت توسط گردش طبیعی آب کافی نبوده و باید به میزان بیشتری خنک شوند. باز شدن شیر در قدرت های بالاتر باعث گشوده شدن مسیر جدیدی برای جریان آب شده و جریان کمتری از بین صفحات سوخت عبور خواهدکرد. در نتیجه میزان خنک سازی صفحات سوخت برای برداشت حرارت کافی نبوده و امکان جدی برای آسیب دیدن صفحات سوخت ایجاد می گردد.

۱-۴-۴-تانک تأخیری[2]

تانک تأخیری با ایجاد توقف کوتاه و تأخیر در جریان آب عبوری از درون قلب باعث واپاشی ایزوتوپ ها با نیمه عمر کوتاه و در نتیجه کاهش اکتیویته آب استخر می شود.

تانک به منظور داشتن اختلاف ارتفاع کافی با استخر وهمچنین محافظت افراد از تشعشعات در زیر سطح زمین قرار داده شده است و هوای داخل تانک نیز به طور مرتب به دودکش تخلیه می شود. تحت قدرت نرمال ۵ MW ، حجم تانک تأخیری m^3 ۴۲ کمتر از حالت کاملاً پر قرار دارد. اگرپمپ مدار اولیه خراب شود راکتور متوقف شده و جریان خنک کننده به وسیله نیروی گرانش و اختلاف سطح آب استخر و تانک تأخیری به درون قسمت خالی تانک ادامه خواهد داشت. پر شدن تانک حدود ۵ دقیقه طول خواهد کشید و در طی این مدت جریان خنک کننده از درون قلب ادامه دارد، بعد از گذشت این زمان حرارت اضافی قلب برداشت شده و خنک سازی قلب توسط باز شدن شیر ایمنی شناور و ایجاد جریان گردش طبیعی خنک کننده در اطراف قلب ادامه می یابد[۱].

---

1. Metal bellow 2.Hold-up tank